

УДК 534.843

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАТОРОВ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РЕВЕРБЕРАЦИИ
В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ**

**THE THEORY AND PRACTICE
OF APPLYING LOW-FREQUENCY RESONATORS
TO SOLVE THE PROBLEMS OF REVERBERATION
IN THE ORTHODOX CHURCHES**

Х.А. ЩИРЖЕЦКИЙ, В.Н. СУХОВ
H.A. SHCHIRZHETSKY, V.N. SUKHOV

(Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук)
(Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)
E-mail: a021069@yandex.ru, svn36@mail.ru

В работе представлены теоретические основания возможности использования объемных резонаторов в качестве низкочастотных звукопоглотителей. Разработаны варианты практических конструкций таких резонаторов, предназначенных для снижения реверберации низких частот при

строительстве православных храмов, в качестве современных аналогов голосников, имевших широкое применение в старорусских церковных сооружениях.

This paper presents the theoretical basis for the possibility of using volumetric resonators as low-frequency sound absorbers. Options of practical designs of such resonators intended for decrease in reverberation of low frequencies, at construction of orthodox temples, as modern analogs of the "golosnikov" which had wide application in old Russian church constructions are developed.

Ключевые слова: объемные резонаторы, время реверберации, звукопоглощение, православные храмы.

Keywords: volumetric resonators, reverberation time, sound absorption, orthodox churches.

В связи с прогрессирующей с конца XX века тенденцией массового строительства в России православных храмов по заданию Минстроя РФ и управления Московской патриархии был разработан Свод правил СП 31-103–99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов [1]. Специалисты НИИСФ приняли активное участие в разработке данного документа по всем вопросам строительной физики и, в частности, по решению проблем шумозащиты и акустике помещений. В последнем случае был использован многолетний опыт специалистов лаборатории акустики залов НИИСФ по исследованию акустики православных храмов, позволивший им разработать акустические решения ряда известных православных церковных сооружений, в том числе проект акустических мероприятий в воссоздаваемом Храме Христа Спасителя [2...4].

Систематизация результатов проведенных исследований позволила прийти к выводам, что основными проблемами акустики храмовых сооружений традиционных христианских конфессий являются следующие.

- Существенные нарушения диффузности (равномерности) звукового поля в помещениях храмов, вызванные традиционными для зданий ортодоксальных христианских конфессий неблагоприятными, с позиции основ архитектурной акустики, объемно-планировочными решениями их модельных залов.

- Избыточная реверберация (гулкость звучания) в этих залах, определяемая традиционно звукоотражающим интерьером, принятым в таких помещениях.

- Существенная зависимость реверберации от степени заполнения храмов прихожанами, затрудняющая оптимальный выбор их времени реверберации.

В последнем случае даже полное заполнение маленьких залов прихожанами не позволяет решить проблемы акустики залов по следующим объективным причинам.

- Заполнение полов храмовых помещений стоящими людьми дополнительно нарушает диффузность звуковых полей в маленьких залах, полностью сохраняя отзвуки от их верхних объемов, наряду с существенным увеличением реверберационно-шумового фона.

- Дополнительно к этому вносимое прихожанами, клиром и хором добавочное звукопоглощение, наряду с характеристиками звукопоглощения традиционного интерьера православных храмов, приводит к увеличению фонда звукопоглощения на средних и особенно высоких частотах (последнее происходит и за счет эффективного звукопоглощения звука в воздухе), что соответственно усиливает отрицательное влияние на разборчивость речи священнослужителей из-за заметного превалирования низких частот.

Именно в силу указанных причин специалисты НИИСФ в методике по расчету ре-

верберации, представленной в документе [1], допустили существенное увеличение "трубки" объемных оптимумов времени реверберации в зависимости от степени заполнения молельных залов прихожанами (см. Приложение М в [1]). Вместе с тем, проведенные исследования наглядно показали, что решение проблем низкочастотной реверберации, оставаясь в рамках визуального облика традиционного интерьера православных храмов, может быть достигнуто только с помощью специальных акустических мероприятий, в том числе возвращения к использованию в конструкциях их ограждений, принятой в ранне-православной церковной практике, системы голосников – аналогов полостных резонаторов, так называемых "резонаторов Гельмгольца" [4].

Подобная работа была проведена специалистами НИИСФ при разработке оптимального акустического решения Храма Христа Спасителя [4]. Задачей настоящей работы являются контрольные расчеты теоретических основ проведенных исследований и на этой базе разработка прикладных конструкций для реального решения проблемы низкочастотной реверберации в православных храмах.

Необходимо отметить, что хронологически возобновление интереса к полостным (объемным) резонаторам – голосникам в "новой" истории православной архитектуры связано с использованием их аналогов в начале 90-х гг. XX в. при строительстве в Белграде Собора Св. Саввы. Информация об этом была использована специалистами НИИСФ при разработке подсобных конструкций для Храма Христа Спасителя.

Ниже излагаются теоретическая база и контрольные расчеты практических решений полостных резонаторов.

При создании полостных резонаторов, именуемых в акустике, как уже упоминалось, резонаторами Гельмгольца, мы должны удовлетворить двум условиям: 1) реактивная составляющая импеданса излучения резонатора, определяемая присоединенной массой горла и упругостью воздушного объема полости, должна быть выше активного сопротивления излучения, что переводит резонатор из режима усиления падаю-

щего звука в режим его поглощения; 2) резонатор должен иметь не только максимум поглощения на основной частоте, но и обеспечивать достаточное поглощение в некоторой полосе частот, называемой обычно полосой эффективного поглощения, определяемой по уровню $0,5A_{\max}$, где A_{\max} – эквивалентная площадь звукопоглощения (далее ЭПЗ) на частоте основного резонанса.

Исходя из этих двух, до некоторой степени противоречивых друг другу требований, представляется правильным следующий порядок расчета резонаторов:

1) определение оптимального частотного диапазона эффективного звукопоглощения резонаторов;

2) определение основных частот, геометрических размеров и формы резонаторов;

3) расчет требуемых величин сопротивления потерь резонатора и импеданса излучения, а также определение необходимости заполнения его полости звукопоглощающим материалом;

4) разработка практического решения конструкции и установление мест размещения резонаторов.

Для выбора оптимального диапазона частот эффективного звукопоглощения резонаторов определяющим является сочетание спектрального состава основных акустических сигналов, передаваемых в храме (прямая и вокализованная речь священнослужителей, хоровое пение), с частотной характеристикой реверберации, при учете особенностей частотной характеристики слухового восприятия. Анализ этих характеристик показывает, что усредненные спектральные максимумы русской речи находятся в диапазоне 250...500 Гц, а вокализованной – 1000...4000 Гц [5]. При этом из опытных данных известна особая важность диапазона частот 800...3000 Гц, вносящего основной вклад в оценку разборчивости речи, что связано, очевидно, как с размещением в этом диапазоне 2-й форманты гласных звуков, так и максимальной чувствительностью слуха в этом диапазоне [6]. Сопоставляя все эти факторы с тем обстоятельством, что фонд звукопоглощения публики значи-

тельно снизит, по мере заполнения храма, время реверберации на частотах выше 400...500 Гц, следует прийти к выводу, что диапазон эффективного звукопоглощения резонаторов должен находиться в пределах от 70...80 до 300...350 Гц. Отсюда понятно, что основные частоты настройки резонаторов, при достижении эффективной полосы звукопоглощения каждого из них в пределах 1/3-1 октавы, должны находиться в диапазоне от 100...125 до 200...250 Гц. Основные частоты одиночных полостных резонаторов рассчитываются по формуле [7]:

$$f_0 = (c_b / 2\pi) \sqrt{B/V}, \quad (1)$$

где V – объем полости; c_b – скорость звука в воздухе; B – проводимость резонатора.

В свою очередь проводимость для резонаторов с круглым сечением короткого горла, практически равного толщине стенки резонатора, составит [7]:

$$B \approx \pi d^2 / 4 (h + 0,8d), \quad (2)$$

где d – диаметр горла; h – толщина стенки резонатора.

Расчеты показывают, что при выполнении ящиков резонаторов из листов фанеры толщиной 8...10 мм обеспечить требуемый диапазон основных частот резонаторов в форме прямоугольного параллелепипеда с круглым отверстием можно при размерах квадратной лицевой панели $a = 0,3...1$ м при заданной глубине (высоте) резонаторов $H=10...60$ см и диаметре отверстий 20...30 см.

Остановившись далее на обеспечении широкой резонансной полосы звукопоглощения резонаторов, составляющей 1/3...1 октаву, следует обратиться к формуле, определяющей частотную характеристику ЭПЗ отдельного резонатора [8]:

$$A / A_{\max} = 1 / (1 + Q^2 \Phi^2), \quad (3)$$

где A = ЭПЗ резонатора; Q – добротность резонатора; $\Phi = f/f_0 - f_0/f$ – частотная расстройка резонатора.

В свою очередь полоса эффективного звукопоглощения ($2\Delta f$) определяется, как уже говорилось, из условия $A/A_{\max} = 0,5$,

что приводит к выражению:

$$2\Delta f = f_0 / Q. \quad (4)$$

Отсюда, задаваясь известными величинами соотношения f_0 и $2\Delta f$ для диапазонов, принятых в акустике, можно получить:

$$Q_{1\text{окт}} = f_0 / 2\Delta f = 1,4, \quad (5a)$$

$$Q_{1/3\text{окт}} = 4,3. \quad (5b)$$

Добротность полостного резонатора равна [8]:

$$Q = k_r / (2\pi f_0 S_r R), \quad (6)$$

где $k_r = (\rho_b c_b^2 S_r^2) / V$ – жесткость (упругость) воздуха в полости; $S_r = \pi d^2 / 4$; $R = R_i + R_r$ – активное сопротивление резонатора; R_i – внутреннее сопротивление потерь в резонаторе; R_r – сопротивление излучения горла.

По известной добротности резонатора и упругости воздуха в полости можно определить требуемое активное сопротивление резонатора:

$$R = R_i + R_r = k_r / (2\pi f_0 S_r Q), \quad (7)$$

откуда:

$$R_i = k_r / (2\pi f_0 S_r Q) - R_r. \quad (8)$$

При моделировании слоя воздуха в горле поршневой диафрагмой [9]:

$$R_r = (\rho_b c_b (\pi d^2 / 8) k_0 d / 2)^2, \quad (9a)$$

где $k_0 = 2\pi f_0 / c_b$ – волновое число центральной частоты резонатора.

Отсюда после несложных выкладок получим:

$$R_r = 15 \cdot 10^{-3} d^4 f_0^2. \quad (9b)$$

Ориентировочные расчеты по формулам (8) и (9) показывают, что при заданной добротности внутреннее сопротивление потерь R должно быть значительно больше сопротивления излучения R_r , что невыполнимо при заполнении полости только воздухом. Отсюда следует, что для эффектив-

ной работы резонаторов их полости должны заполняться рыхлым звукопоглотителем, имеющим большие потери на внутреннее трение (минеральная или стекловата).

Для контроля активного излучения резонаторов следует рассчитать их критические частоты, выше которых активное сопротивление излучения превышает реактивное и, следовательно, возможна потеря поглощающих свойств резонаторов. Для поршневой диафрагмы это происходит при следующем условии [9]:

$$k_{гр}d/2 \geq 1,38,$$

где $k_{гр} = 2\pi f_{гр}/c_v$.

Отсюда:

$$f_{гр} = 1,38c_v/\pi d \approx 149,4/d. \quad (10)$$

Расчеты граничных частот для диаметров горла 0,2...0,3 м показывают, что в любом случае они превышают 500 Гц, что обеспечивает работу резонаторов в режиме поглощения в требуемом низкочастотном диапазоне.

Общее количество резонаторов можно определить из следующего выражения:

$$N = A_{общ}/A_1, \quad (11)$$

где $A_{общ}$ – общий фонд звукопоглощения; A_1 – ЭПЗ одного резонатора.

При этом ЭПЗ одного резонатора можно считать, как принято, по уровню -3 дБ от максимума, то есть:

$$A_1 = 0,5A_{1max}, \quad (12)$$

где A_{1max} – ЭПЗ одного резонатора на основной частоте.

В свою очередь A_{1max} можно определить на основе известной формулы расчета максимума поглощения одиночного резонатора в приближении для низких частот [8]:

$$A_{1max} = (2/\pi)(c_v^2/f_\omega^2)\{(R_i/R_r)_1/[1+(R_i/R_r)_1]\}. \quad (13)$$

Наибольшее значение A_{max} получается при $R_i = R_r$, что соответствует резонаторам с высокой добротностью ($Q > 10...20$), которая получается только в случае пустых по-

лостей, то есть без заполнения их пористым звукопоглотителем, и что, следовательно, приведет к весьма узкой частотной полосе эффективного звукопоглощения. В нашем случае для обеспечения эффективного звукопоглощения в полосе не менее 1/3 окт. добротность должна быть порядка 1...4, для чего, как известно из опытных данных (например, [7]), $R_i \gg R_r$, во всяком случае не менее $10R_r$. Основываясь на этом соотношении, для резонаторов с основными частотами в диапазоне 100...200 Гц, $A_{1г}$, по данным расчетов, не может превышать 0,3...0,5 ед. ЭПЗ.

Данная методика в полном объеме была использована при разработке акустического решения строящегося в настоящее время храма во имя вмч. Георгия Победоносца в Коптево (Москва). Акустические расчеты храма показали, что достижение в храме требуемого по [1] значения времени реверберации ($\sim 2,2$ с на средних частотах при полном заполнении зала), даже с допущением подъема реверберации на низких частотах до 30%, не может быть достигнуто без применения в интерьере специальных НЧ-резонаторов представленных типоразмеров и методов их расчета.

Отсюда по формуле (11) получим:

$$N_{min} = 200,$$

то есть в интерьере храма должно быть размещено не менее 200 штук низкочастотных резонаторов-голосников с основными частотами, находящимися в диапазоне 100...300 Гц. Очевидно, что при условии обеспечения требуемой низкой добротности (то есть широкополосности) резонаторов оптимальным будет устройство 100 шт. с основной частотой 125 Гц, и 100 шт. – с частотой 250 Гц.

Каждый резонатор представляет собой полость в виде прямоугольного параллелепипеда с круглым отверстием – горлом, направленным внутрь помещения храма и прикрытого с внешней стороны декоративной звукопрозрачной тканью. Для расширения полосы эффективного звукопоглощения резонаторов их полости предлагается заполнить пористым звукопоглотителем (минеральная вата или стекловолокно). Ма-

териал коробов резонаторов – фанера, оргстекло и т.п. материалы толщиной 8...10 мм, короба должны выполняться двух типоразмеров: 1) $0,4 \times 0,4 \times 0,3$ м, $d_{\text{горла}} = 0,2$ м; 2) $0,4 \times 0,4 \times 0,6$ м, $d_{\text{горла}} = 0,2$ м (рис. 1 – резонаторы Гельмгольца (низкочастотные звукопоглотители), внутренний объем резонатора заполнить звукопоглощающим материалом (супертонкими базальтовыми или стеклянными волокнами с объемной плотностью 30...40 кг/м³). Внутренние размеры резонатора даны в мм).

Оптимальным местом размещения резонаторов являются своды трапезной и молельного зала, конус и барабан центрального купола. Короба должны быть равномерно распределены по площади их размещения с расстоянием между их акустическими центрами не менее, чем $5d_{\text{горла}}$, то есть = 1,0 м, во избежание взаимного влияния резонаторов друг на друга [5].

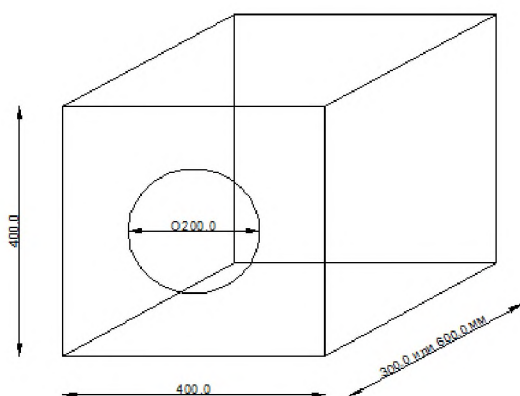


Рис. 1

В ходе дискуссии по привязке предложений НИИСФ к строительной практике, по предложению настоятеля Храма в Коптево, было принято решение о возвращении предложенной формы объемных НЧ-резонаторов к традиционной форме древнерусских голосников в виде кувшинов из огнеупорной глины, и, за счет некоторой коррекции их объемов, возможному уменьшению их количества. Контрольные акустические расчеты показали, что НЧ-резонаторы (кувшины), форма и геометрические параметры которых представлены на эскизе (рис. 2 – эскиз низкочастотных резонаторов (кувшинов)), должны быть равномерно

распределены по интерьеру Храма, с расстоянием между их акустическими центрами не менее 1 м. Дополнительные расчеты показали, что при минимально допустимом общем количестве резонаторов не менее 100 шт. оптимальное соотношение их состоит в следующей пропорции: 50 шт. в молельном зале Храма и 50 шт. в трапезной.

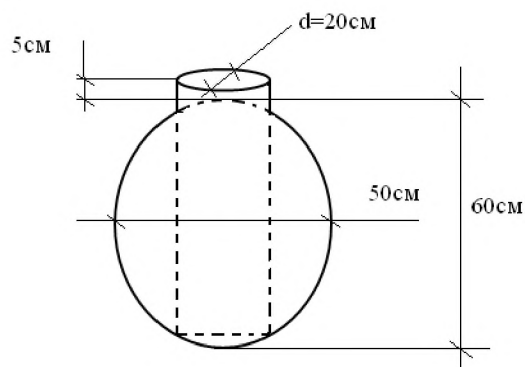


Рис. 2

Дополнительным преимуществом исполнения объемных НЧ-резонаторов в виде кувшинов является возможность использования их не только как чисто технические конструкции, вмонтированные в ограждения Храма, но и также, по согласованию с архитекторами и причтом, в виде декоративных элементов интерьера, размещенных на специальных подставках как в молельном зале Храма, так и в помещении трапезной.

ЛИТЕРАТУРА

1. СПЗ 1103–99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов. – М., 2000.
2. Щиржецкий Х.А., Чесноков А.Н. и др. Акустика соборов Московского Кремля // Акустический журнал. – 1998, т.44, №4. С.498.
3. Щиржецкий Х.А., Олейникова Т.Н. Акустика. Троицко-Измайловский Собор в Санкт-Петербурге. – М., 1999.
4. Борисов Л.А., Щиржецкий Х.А. Акустика Храма Христа Спасителя // Сб. докл. X Сессии Российского акустического общества. – М., 2000.
5. Вахитов Я.И. Слух и речь. ЛИКИ. – Л., 1973.
6. Скучик У. Основы акустики. – М., 1973.
7. Контюри Л. Акустика в строительстве. – М.: Стройиздат, 1960.
8. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г.Л. Осипова и Е.Я. Юдина. – Гл. 9. – М.: Стройиздат, 1987.

9. Ширжецкий Х.А., Борисов Л.А. Применение низкочастотных резонаторов для оптимизации времени реверберации в Храме Христа Спасителя в Москве // Вестник отделения строительных наук РААСН. – 1999, №2.

REFERENCES

1. SP31103–99. Zdaniya, sooruzheniya i kompleksy pravoslavnyh hramov. – M., 2000.

2. Shirzheckij H.A., Chesnokov A.N. i dr. Akustika soborov Moskovskogo Kremlya // Akusticheskij zhurnal. – 1998, t.44, №4. S.498.

3. Shirzheckij H.A., Olejnikova T.N. Akustika. Troicko-Izmajlovskij Sobor v Sankt-Peterburge. – M., 1999.

4. Borisov L.A., Shirzheckij H.A. Akustika Hrama Hrista Spasitelya // Sb. dokl. X Sessii Rossijskogo akusticheskogo obshestva. – M., 2000.

5. Vahitov Ya.Sh. Sluh i rech. LIKI. – L., 1973.

6. Skuchik U. Osnovy akustiki. – M., 1973.

7. Kontyuri L. Akustika v stroitelstve. – M.: Strojizdat, 1960.

8. Snizhenie shuma v zdaniyah i zhilyh rajonah / Pod red. G.L. Osipova i E.Ya. Yudina. – Gl. 9. – M.: Strojizdat, 1987.

9. Shirzheckij H.A., Borisov L.A. Primenenie nizkochastotnyh rezonatorov dlya optimizacii vremeni reverberacii v Hrame Hrista Spasitelya v Moskve // Vestnik otdeleniya stroitelnyh nauk RAASN. – 1999, №2.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 18.06.18.